

中国 1 min 降雨量极值的统计研究

董双林

(北京应用气象研究所, 北京 100029)

摘 要 由于中国降水阵性很强, 短历时降水极值就是世界极值, 已有的估计 1 min 降雨量极值的气候学模型可能不适合用于中国。在分析大量水文气象资料的基础上, 提出了时间风险率确定条件下降雨量极值随降水历时变化的幂律模型, 找到了用业务自记资料估计 1 min 降雨量极值的方法。进一步建立了 3 类气候学模型, 与国外已有模型相比, 不仅更适合中国降水气候特征, 具有较高精确度, 且可反映地区、季节和年际变化, 为有关设备的设计和應用提供更多信息。

关键词 中国 降雨量 统计研究

1 引言

中国位于东亚季风区, 幅员辽阔, 地形多变, 降水气候异常复杂。平均年降水量从台湾火烧寮的 6557.8 mm/a 到新疆托克逊的 6.9 mm/a, 呈现南多北少、东多西少, 丘陵山地迎风坡明显增多的空间分布。四季雨量分布不均, 年际变化很大。降水阵性明显, 夏季多暴雨, 形成降水的天气系统尺度小, 降水记录代表性差。因此, 中国降水气候研究困难很大。另一方面, 除西部人口稀少地区外, 雨量测站相当密集。如《中国短历时暴雨统计资料》使用了 14000 个测站, 190 000 站年的资料。其中 10 min 点雨量记录查阅了 5351 个雨量站的 65757 站年的整编资料。对于分析中国降水气候极值和有关统计研究, 资料比较充足。

近 20 年来, 对短历时降水量统计量的需求与日俱增。主要兴趣在于 1 min 降雨量(一般称为瞬时降水强度)的统计结果。短历时降水量频率分布对于很多类设备的设计和运行都是十分重要的。降水, 尤其是高强度降水, 衰减了用于卫星探测和跟踪、通信、空中交通管制、侦察以及武器系统, 特别是高技术武器系统的微波信号。强降水可引起喷气发动机过度冷却, 导致熄火和失事。此外, 强降水还能引起向密封组件(如电器仪表)内部的渗漏。因此, 1 min 降雨量的统计量引起了广泛的重视。

但是 1 min 降雨量, 或瞬时降水强度, 不是气象业务观测项目。于是, 出现了多种用少量 1 min 降雨量观测值与业务观测记录的统计模型^[1~3], 应用于工程设计或制定军用标准^[4,5]等方面。中国降水气候特征与欧美等有少量 1 min 降雨量观测的地区存在显著差别。如降水的阵性很强, 世界上短历时降水记录极值出现在中国, 而长历时降水记录极值, 中国比世界极值小得多。因此, 有必要研究中国的 1 min 降雨量统计模型。

2 用 10 min 降雨量记录估算 1 min 降雨量工作极值

2.1 时间风险率 p 确定条件下降水量极值 R 随着降水历时 t 变化的幂律模型

对 190 000 站年的资料, 其中 6 h、1 h、10 min 降水量分别有 171 158、78 714、64 757 站年资料, 分析频率分布和地理分布。对于众数和高分位值, 发现降水量 R 和降水历时 t 在双对数纸上近似呈线性分布。因此, 用模型

$$R = at^b \quad (1)$$

来描述 R 和 t 的关系。

用 142 站 1980~1984 年 5、10、15、20、30、45、60、120、180、240、360、720、1 440 min 降水量年极值资料拟合模型 (1) 的结果表明, 只对 60 min 以下资料拟合时, $\ln R$ 和 $\ln t$ 的线性相关系数 $r_{\ln R, \ln t}$ 在 0.9~0.95。若只对 5 年的各历时降水量极大值拟合时, 该相关系数增加到 0.95 以上, 其中 88 站达 0.99。

用 65 站 2 个严酷月 10 min 降雨量自记资料, 经滑动求和得不同降水历时降水量的样本, 再求出各个时间风险率极值。拟合模型 (1) 的结果表明, 时间风险率 p 为 0.1%、0.5%、1%、5%, 相关系数大于 0.995 的站数与总站数的比分别为 51/65、62/65、62/65、51/65; 10 min 降雨量极值拟合平均误差分别为 0.055、0.015、0.018、0.00 mm; 标准差分别为 0.382、0.108、0.062、0.00 mm。可见, 模型 (1) 较好地拟合了时间风险率固定条件下, 降水量极值随降水历时的变化。系数 a 就是相应时间风险率的 1 min 降雨量极值。

分析 444 个测站 10 min 和 1 h 降水量记录极值拟合模型 (1) 的幂指数 b 的频率分布, 其众数为 0.5, 与国外文献一致。65 站 10 min 降水量自记资料得出的 b 的频率分布也是合理的。

用 444 个测站 10 min 和 1 h 降水量记录极值拟合模型 (1) 得出的 1 min 降雨量极值的地理分布 (图略), 明显特征是较大值位于中国地形 3 个台阶的第一和第二台阶的交界处。这些地区对于短历时降水来说, 既可得到充足的水汽, 又可产生不同气团交绥和明显的地形增幅作用。对于 1 min 降雨量来说, 地形增幅作用, 不仅在于动力抬升和水平辐合, 而且在于使热力作用和动力作用结合, 加强垂直运动时空变化, 在暴雨中心上空形成液态水含量在垂直方向明显辐合, 造成相应于 1 min 降雨量极值的极高的含水量。因此, 这种地理分布是合理的。估计的全国极值是 27.0 mm/min, 1979 年 7 月 20 日出现于贵州安顺。其中还有更大的极值, 如 27.8、29.5、40.0 mm/min 等, 对应的 10 min 和 1 h 降雨量极值出现时间不同, 作为记录极值的代表性差。中国更大的记录极值是可能的。如美国马里兰州尤尼恩威尔 (Unionville) 1956 年 7 月 4 日观测的 1 min 降雨量极值为 31.2 mm, 其相应的 50 min 降雨量仅 72.1 mm, 认为含水量的垂直辐合是使 1 min 降雨量很大的重要原因。中国地形复杂, 引起含水量垂直辐合的可能是存在的。图 1 给出的工作极值地理分布也反映上述特征, 说明幂律模型是合理的。

2.2 幂律模型外延到降水历时 t 为 1 min 的可靠性

曲线拟合的稳定性和外延基础上统计结果的合理性, 说明了幂律模型外延到降水历

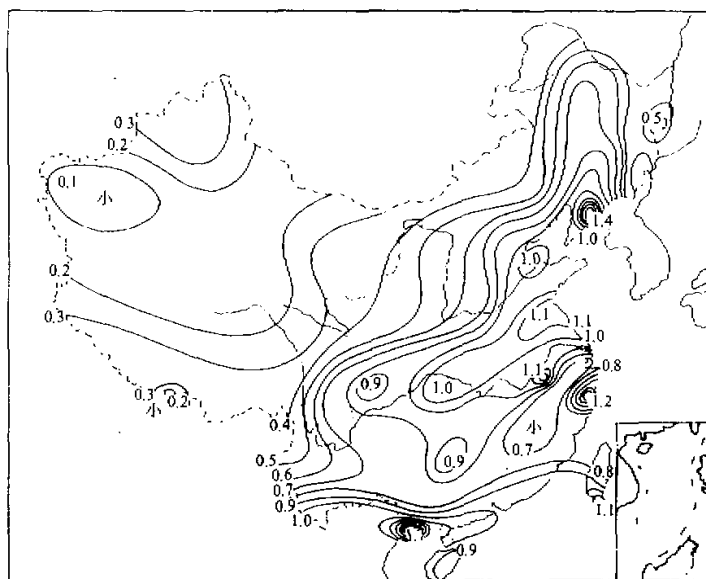


图 1 119 站时间风险率为 0.1% 的 1 min 降雨量极值 (单位: mm/min)

时为 1 min 的可靠性。 R 与 t 的关系是双对数坐标下的线性关系, 绝大多数测站线性相关系数达到 0.995 以上, 在曲线拟合中也是罕见的, 而且这样高的拟合精度是在不断改进分析方案, 使统计分析更符合物理含义情况下获得的, 所以该幂律模型是稳定的。对 142 个测站 5 年 5、10、15、20、30、45、60 min 等降水历时降雨量极大值, 拟合该模型的高精度, 说明可以外延到 5 min。2.1 节分析了在外延基础上得出的幂指数 b 频率分布的合理性和 1 min 降雨量记录极值地域分布的合理性, 与国外相应值的可比性。工作极值也有类似情况, 在制定国家军用标准 GJB1172.1-18-91 时, 已进行了较严格的论证¹⁾。

3 估算 1 min 降雨量工作极值的气候学模型

由于短历时降水量观测的测站数和观测值都很少, 不能统计全国或世界范围的 1 min 降雨量工作极值。国外采用的方法是, 用少量 1 min 降雨量观测值和各个测站降水气候值建立回归模型, 称为气候学模型。一般使用的气候值是月降水指数、月降水量、地理纬度。模型简单, 难以适合中国降水阵性很强的情况。本文建立了 3 类模型: 用 65 站自记资料由模型 (1) 得出的 1 min 降雨量工作极值 R_{65} , 与逐日降水资料的各种统计量 R_i 的 51 个因子 (表略) 建立回归模型 Md (代号); 用 R_{65} 与月降水量、月平均气温、月平均相对湿度、当月平均绝对湿度、日降水量阈值大于等于 0.1 mm、1 mm

1) 董双林等, 1992, 军用设备气候极值——国家军用标准 GJB1172 宣贯材料, 5-1~5-40。

的降水指数(月降水量除以降水日数)、测站地理纬度等建立了回归模型 Mm; 用 Md 的计算值与月平均值、降水指数、地理纬度等建立了回归模型 Mdm。模型 Md 适用于有逐日降水量记录的(119个)测站, 而 Mm、Mdm 适用于任何气候站, 但需通过合理性检验。

由于中国降水气候非常复杂, 少数模型应用于全国, 不是失之过粗, 就是容易出现不合理结果。应用多个模型, 并进行合理性检验, 则可兼顾各种降水气候的测站。合理性检验看是否偏小或偏大。如果估计结果为负值, 明显偏小, 当然不合理。估计值应满足

$$R_m \leq \sum R_{p_j} (p_j - p_{j-1}) T, \quad (2)$$

式中, R_m 为月降水量, 单位取 mm; R_{p_j} 为时间风险率 p_j 的 1 min 降雨量工作极值, 单位取 mm/min; p_j ($j = 1, 2, \dots$) 为时间风险率, $j=1$ 时, $p_{j-1} = p_0 = 0$; T 为全月分钟数。

其他合理性检验包括样本量大小, 与该站降水气候特征是否符合等内容。选择 7 月为严酷月份, 对于有逐日降水量资料的 119 个测站, 用 Md 可估计逐年 7 月份瞬时降水强度工作极值, 再求多年平均作为模型估计值。时间风险率 $p=0.1\%$ 的全国极值出现在广西东兴, 为 1.70 mm/min。表 1 给出限定入选因子数不大于 3 的模型 Md 的参数。表 2 给出模型 Mdm 的参数, 表中 x_0 为常数项, 相同风险率的下一行为 F 水平较高的回归方程的因子和系数。

表 1 估计 1 min 降水量极值 (mm/min) 的气候模型 Md

时间风险率	入选因子				回归系数			
0.1%	b_0	b_9	b_{26}	b_{30}	0.242 519	-0.001 797	0.002 386	0.005 033
0.5%	b_0	b_{17}	b_{26}	b_{29}	-0.045 121	-0.086 952	0.001 461	0.000 790
1%	b_0	b_1	b_9	b_{26}	-0.041 676	-0.065 6	0.000 424	0.000 790
2%	b_0	b_{17}	b_{27}	b_{29}	-0.017 856	0.026 396	0.000 313 1	-0.000 236 7
5%	b_0	b_{27}	b_{29}		-0.004 914 2	0.000 089 95	-0.000 089 87	

表 2 给出估计 1 min 降水量极值 (mm/min) 的气候模型 Mdm

时间风险率	入选因子						回归系数		
0.1%	x_0	x_1	x_3	x_5	x_6		-0.275 4	0.002 232	-0.004 554
	x_0	x_1	x_5				-0.144 0	0.001 567	0.025 69
0.5%	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	-0.367 8	0.003 334	0.017 66
	x_0	x_1	x_2	x_4			-0.345 2	0.003 319	0.013 85
1%	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	-0.495 7	0.003 342	0.022 71
	x_0	x_1	x_2	x_4			-0.426 6	0.003 227	0.015 59
2%	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	-0.464 1	0.003 368	0.023 65
	x_0	x_1	x_2	x_4			-0.395 9	0.003 288	0.014 34
3%	x_0	x_1	x_2	x_4	x_5		-0.019 58	0.000 188	0.000 393
	x_0	x_1	x_2	x_3			-0.014 58	0.000 163	-0.001 944
4%	x_0	x_1	x_3	x_4	x_5	x_6	-0.000 348	0.000 108	-0.000 272
	x_0	x_1	x_3	x_5			0.002 088	0.000 098	-0.000 707
5%	x_0	x_1	x_3	x_4	x_5	x_6	0.010 23	0.000 078	-0.000 262
	x_0	x_1	x_3	x_6			0.012 16	0.000 074	0.000 185

表 1 中入选因子 b_1 是日降水量 $R_d \geq 150$ mm 日数, b_9 是 $R_d \geq 150$ mm 总雨量, b_{17} 是 $R_d \geq 100$ mm 日数, b_{26} 是 $R_d \geq 10$ mm 总雨量, b_{27} 是 $R_d \geq 5$ mm 总雨量, b_{29} 是 $R_d \geq 100$ mm 降水指数, b_{30} 是 $R_d \geq 50$ mm 降水指数。表 2 中 x_1 是多年平均月降水量 (mm), x_2 是月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), x_3 是 ≥ 5 mm/d 的降水指数, x_4 是 ≥ 0.1 mm/d 的降水指数, x_5 是月平均绝对湿度 (hPa), x_6 是纬度 (L) 气温 (T) 因子 $f(L, T)$, 即

$$f(L, T) = \begin{cases} 0, & L \leq 23.5, \\ (L - 23.5)T, & 23.5 < L \leq 40, \\ (40 - 23.5)T, & L > 40. \end{cases} \quad (3)$$

图 2 给出用模型 Mdm 计算的 671 站时间风险率为 0.1% 的 1 min 降雨量极值的全国分布。这一分布符合中国降水的气候特征。等值线密集区位于中国地形三个台阶的第一、二两个台阶的交界处附近, 与瞬时降水强度记录极值的大值中心区相一致, 与月总降水量剧烈减小区相吻合。模型 Mm 是为和国外的气候学模型相比较而建立的。比较结果表明, 拟合样本的复相关系数两者相当。但国外的模型适用于四季, 相关样本方差较大, 本文的模型适用于 7 月, 方差较小, 所以拟合绝对误差较小。从入选的因子看, 本文模型月降水量首先入选, 国外模型降水量阈值较小的降水指数首先入选。反映两者降水气候特征有较大差别。两种模型计算中国的瞬时降水强度极值, 结果差别较大。说明国外模型不太适合中国情况。本文 3 类模型适用地区范围由小到大依次为 Md、Mm、Mdm, 精确度则相反。在我国东部, 3 种模型都适用, 向西随着年降水量或严酷月降水量的减小, 模型适用范围出现差别。因为降水阵性强弱, 时间风险率大小等对适用测站都有影响, 所以具体适用测站要由估计结果的合理性分析来确定。

另外, 图 1 给出的是由 Md 计算的逐年 1 min 降雨量工作极值的多年平均值, 而且测站密度较小, 主要显示大的地域变化, 验证幂律模型的合理性。图 2 是 Mdm 计算的 671 个测站 (少数不合理的除外) 1 min 降雨量工作极值, 是用少数年份的严酷月资料 (与气温等其它要素相一致) 计算的, 而且测站密度较大, 所以较多反映了降雨量极值的局地变化。

4 小结

分析 190 000 站年的降水量资料, 导出时间风险率 p 确定条件下降水量极值 R 随着降水历时 t 变化的幂律模型; 用 10 min 降雨量自记资料滑动求和得出不同时间风险率的降水历时为 10、20、30、40、50、60 min 降水量极值, 再拟合这一幂律模型, 使拟合相关系数 90% 测站达到 0.995 以上, 找到了用业务自记资料估计 1 min 降雨量极值的方法。以此为基础, 建立了 3 类气候模型, 估计全国各测站 (西部资料稀少测站除外) 1 min 降雨量极值。与国内外以少数地区、少数年份 1 min 降雨量直接测量值为基础的模型相比较, 所得结果更适合中国降水地区变化、季节变化、年际变化都很大的气候特征, 具有较高精确度。由于 10 min 降雨量自记资料比较普遍, 该方法和模型能够反映瞬时降水强度极值的不同地区, 不同季节及年际变化, 为有关设备的设计和应用提供



图 2 671 站时间风险率为 0.1% 的 1 min 降雨量极值 (单位: mm/min) 的全国分布

更多的信息。

参 考 文 献

- 1 Tattelman, P. and D. D. Grantham, 1982, A Survey of Techniques for Estimating Short-duration Rainfall Rate Statistics, Air Force Surveys in Geophysics No. 441, AFGL-TR-82-0357, AD-A125705.
- 2 Tattelman, P. and D. D. Grantham, 1983, Northern Hemisphere Atlas of 1-Minute Rainfall Rates, AD-A145411.
- 3 Briggs, J., and Harker, J. A., 1969, Estimates of the duration of short-period rainfall rates based on clock-hour values, *Meteo. Mag.*, **98**, 246~252.
- 4 Synopsis of Background Material for MIL-STD-210B, Climatic Extremes for Military Equipment, 1974.
- 5 Military Standard, 1987, Climatic Information to Determine Design and Test Requirements for Military Systems and Equipment, 14~16.

A Statistical Research for 1-Minute Rainfall Extremes of China

Dong Shuanglin

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

Abstract The power law model by which rainfall extremes change with the duration of precipitation for confirmed time risk is established. The method estimating 1-minute rainfall extremes according to operational autographic data is given in the paper. Based on the method three kinds of climatic models of 1 min rainfall extremes to estimate are developed. These models are not only more suitable for the rainfall climatic characteristics of China, but also provide much information for the designs and applications of the relative equipments.

Key words China rainfall statistical research